

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 09-178415

(43)Date of publication of application : 11.07.1997

G01B 9/02
G01B 11/00

G01B 9/02
G01B 11/00

(71)Applicant : NIKON CORP

(72)Inventor : KAWAI HITOSHI

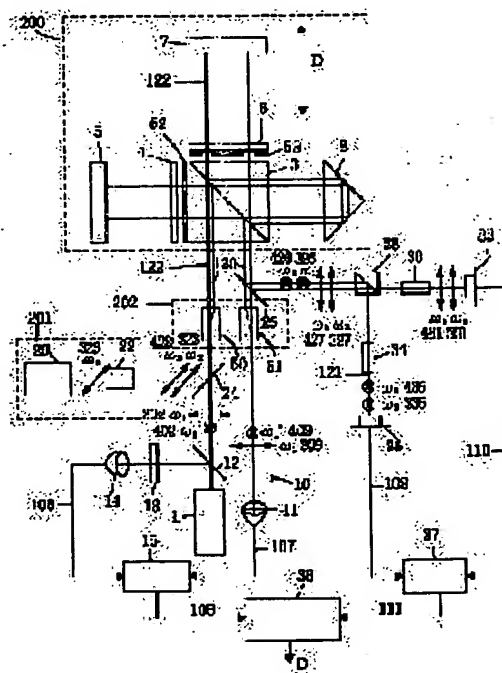
TSUKIHARA KOICHI

(54) LIGHT WAVE INTERFERENCE MEASURING DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide such a light wave interference measuring device with high measuring precision as being capable of reducing non-linear errors resulting from error light mixed in a reference light passage or a measurement light passage in a polarizing beam splitter.

SOLUTION: A light splitting means 50 is arranged in a light passage between a light source 1 and a polarizing beam splitter 3 to polarizingly split first to third lights from the light source 1 into light with a first polarized condition and light with a second polarized condition and emit the light with the first polarized condition and the light with the second polarized condition along mutually parallel light passages at a preset space. A displacement amount of a moving mirror 7, measured in accordance with a first interference light is corrected, based on refraction factor variation information in the measurement light passages measured in accordance with a second interference light and a third interference light.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-178415

(43) 公開日 平成9年(1997)7月11日

(51) IntCl.⁶

G 0 1 B 9/02
11/00

識別記号

庁内整理番号

F I

G 0 1 B 9/02
11/00

技術表示箇所

G

審査請求 未請求 請求項の数14 F D (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願平7-351078

(22) 出願日 平成7年(1995)12月25日

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 河井 育

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株
式会社ニコン内

(72) 発明者 月原 浩一

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株
式会社ニコン内

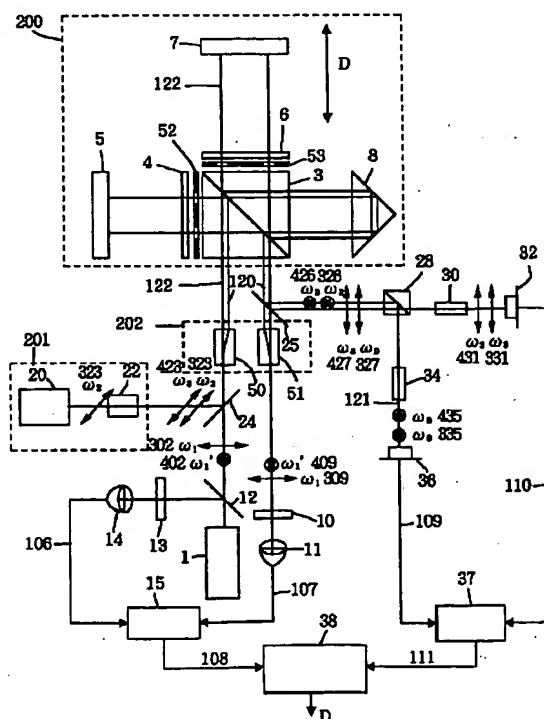
(74) 代理人 弁理士 山口 孝雄

(54) 【発明の名称】 光波干渉測定装置

(57) 【要約】

【課題】 偏光ビームスプリッターにおいて参照光路や測定光路に混入した誤差光に起因する非線形誤差を低減した、測定精度の高い光波干渉測定。

【解決手段】 光源部と偏光ビームスプリッターとの間の光路中に配置され、光源部からの第1の光乃至第3の光を第1の偏光状態を有する光と第2の偏光状態を有する光とにそれぞれ偏光分離するとともに、第1の偏光状態を有する光と第2の偏光状態を有する光とを所定の間隔を隔てた互いに平行な光路に沿って射出するための光分離手段とを備え、第1干渉光に基づいて測定された移動鏡の変位量を、第2干渉光および第3干渉光に基づいて測定された測定光路中の屈折率変動情報に基づいて補正する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 所定の周波数を有する第1の光と、互いに異なる周波数を有する第2の光および第3の光とを同一光路に沿って出力するための光源部と、前記光源部から出力された前記第1の光乃至前記第3の光を、固定鏡までの参照光路に沿って導かれる第1の偏光状態を有する参照光と、移動鏡までの測定光路に沿って導かれる第2の偏光状態を有する測定光とにそれぞれ偏光分離するための偏光ビームスプリッターと、前記測定光路および前記参照光路を介した前記第1の光に基づいて、前記測定光路を介した測定光と前記参照光路を介した参照光との第1干渉光を生成するための第1干渉光生成系と、前記測定光路を介した前記第2の光および前記第3の光のうち一方の光の周波数を他方の光の周波数とほぼ一致させて第2干渉光を生成するための第2干渉光生成系と、前記参照光路を介した前記第2の光および前記第3の光のうち一方の光の周波数を他方の光の周波数とほぼ一致させて第3干渉光を生成するための第3干渉光生成系と、前記光源部と前記偏光ビームスプリッターとの間の光路中に配置され、前記光源部からの前記第1の光乃至前記第3の光を前記第1の偏光状態を有する光と前記第2の偏光状態を有する光とにそれぞれ偏光分離するとともに、前記第1の偏光状態を有する光と前記第2の偏光状態を有する光とを所定の間隔を隔てた互いに平行な光路に沿って射出するための光分離手段とを備え、前記第1干渉光に基づいて測定された前記移動鏡の変位量を、前記第2干渉光および前記第3干渉光に基づいて測定された前記測定光路中の屈折率変動情報に基づいて補正することを特徴とする光波干渉測定装置。

【請求項2】 前記偏光ビームスプリッターにおいて前記参照光路に混入した誤差光および前記測定光路に混入した誤差光を除去するための除去手段をさらに備えていることを特徴とする請求項1に記載の光波干渉測定装置。

【請求項3】 前記除去手段は、前記偏光ビームスプリッターと前記固定鏡との間の光路中に配置され、所定の参照光路に沿った参照光だけを通過させるための第1空間フィルターと、前記偏光ビームスプリッターと前記移動鏡との間の光路中に配置され、所定の測定光路に沿った測定光だけを通過させるための第2空間フィルターとを有することを特徴とする請求項2に記載の光波干渉測定装置。

【請求項4】 前記光分離手段は、正レンズと、該正レンズの焦点位置に位置決めされたウォラストンプリズムとを有することを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項に記載の光波干渉測定装置。

【請求項5】 前記光分離手段は、偏光ビームスプリッ

ターと反射鏡とを有することを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項に記載の光波干渉測定装置。

【請求項6】 前記第1干渉光生成系は、互いに平行な光路に沿って前記偏光ビームスプリッターから射出された参照光と測定光とを同一光路上に結合させるための光結合手段をさらに備えていることを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項に記載の光波干渉測定装置。

【請求項7】 前記光結合手段は、正レンズと、該正レンズの焦点位置に位置決めされたウォラストンプリズムとを有することを特徴とする請求項6に記載の光波干渉測定装置。

【請求項8】 前記光結合手段は、偏光ビームスプリッターと反射鏡とを有することを特徴とする請求項6に記載の光波干渉測定装置。

【請求項9】 前記偏光ビームスプリッターと前記固定鏡との間の光路中に配置された1/4波長板と、前記偏光ビームスプリッターと前記移動鏡との間の光路中に配置された1/4波長板と、前記参照光路を1往復して前記偏光ビームスプリッターを介した参照光を反射して前記偏光ビームスプリッターを介して前記固定鏡に導くとともに、前記測定光路を1往復して前記偏光ビームスプリッターを介した測定光を反射して前記偏光ビームスプリッターを介して前記移動鏡に導くための反射手段とをさらに有することを特徴とする請求項1乃至8のいずれか1項に記載の光波干渉測定装置。

【請求項10】 前記参照光路を1往復して前記偏光ビームスプリッターを介した参照光と、前記測定光路を1往復して前記偏光ビームスプリッターを介した測定光とを偏光分離するための第2偏光ビームスプリッターをさらに有し、

前記反射手段は、前記参照光路を1往復して前記偏光ビームスプリッターおよび前記第2偏光ビームスプリッターを介した参照光を反射して前記第2偏光ビームスプリッターおよび前記偏光ビームスプリッターを介して前記固定鏡に導くための第1反射手段と、前記測定光路を1往復して前記偏光ビームスプリッターおよび前記第2偏光ビームスプリッターを介した測定光を反射して前記第2偏光ビームスプリッターおよび前記偏光ビームスプリッターを介して前記移動鏡に導くための第2反射手段とを有することを特徴とする請求項9に記載の光波干渉測定装置。

【請求項11】 前記光源部は、周波数が互いにわずかに異なり且つ偏光方位が互いに直交する周波数 ω_1 の光と周波数 ω_1' の光とを含んだ光を前記第1の光として出力し、

前記偏光ビームスプリッターは、前記周波数 ω_1 の光を前記測定光に、前記周波数 ω_1' の光を前記参照光にそれぞれ偏光分離することを特徴とする請求項1乃至10のいずれか1項に記載の光波干渉測定装置。

【請求項12】 前記光源部は、
前記第1の光を出力するための第1光源部と、
前記第2の光および前記第3の光を出力するための第2光源部と、
前記第2光源部からの前記第2の光および前記第3の光と、前記第1光源部からの前記第1の光とを同一光路上に結合させるための周波数結合素子とを有することを特徴とする請求項1乃至11のいずれか1項に記載の光波干渉測定装置。

【請求項13】 前記第2光源部は、前記第2の光を出力するための光源と、前記光源からの前記第2の光の一部を第2高調波に変換し、該第2高調波を前記第3の光として出力するための第1周波数変換手段とを有し、
前記第2干渉光生成系は、前記測定光路を介した前記第2の光を第2高調波に変換するための第2周波数変換手段を有し、
前記第3干渉光生成系は、前記参照光路を介した前記第2の光を第2高調波に変換するための第3周波数変換手段を有することを特徴とする請求項12に記載の光波干渉測定装置。

【請求項14】 前記第2光源部は、前記第2の光および前記第3の光のうち少なくともいずれか一方の光の周波数をわずかにシフトさせるための周波数シフト手段をさらに有することを特徴とする請求項12または13に記載の光波干渉測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は光波干渉測定装置に関し、特に高精度な変位計測を行うための光波干渉測定装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】図14は、従来の光波干渉測定装置の構成を概略的に示す図である。図14の光波干渉測定装置は、移動鏡906の光軸方向（図中矢印方向）の真の変位量Dを測長するものである。測長用光源912は、周波数 ω_1 の光と周波数 ω_1' （ $\omega_1' = \omega_1 + \Delta\omega_1$ ）の光とを含む光を射出する。この2つの光は、周波数が互いにわずかに異なり、偏光方位が互いに直交している。

【0003】この2つの光は、ビームスプリッター913を介して偏光ビームスプリッタ904に入射し、周波数 ω_1' の光と周波数 ω_1 の光とに分離される。周波数 ω_1' の光は参照光となり、固定鏡905で反射された後、再び偏光ビームスプリッタ904に戻る。また、周波数 ω_1 の光は測定光となり、移動鏡906で反射された後、再び偏光ビームスプリッタ904に戻る。

【0004】偏光ビームスプリッタ904に戻ってきた測定光と参照光とは、同一光路に沿って偏光ビームスプリッタ904から射出される。同一光路に沿って偏光ビームスプリッタ904から射出された測定光と参照光とは、偏光子931を介して干渉する。偏光素子931

は、具体的には参照光の偏光方位と測定光の偏光方位のそれぞれに対して45°傾いて配置された偏光板である。偏光素子931を介して生成された干渉光は、受光素子916で受光される。受光素子916で変換された干渉ビート信号（周波数 $\Delta\omega_1$ ）934は、位相計917に入力される。

【0005】一方、測長用光源912から射出された2つの光の一部はビームスプリッタ913によって反射され、偏光素子930を介して干渉する。偏光素子930を介して生成された干渉光は受光素子914によって検出され、参照信号（周波数 $\Delta\omega_1$ ）933として位相計917に入力される。なお、偏光素子930は、偏光素子931と同様に2つの光を偏光干渉させる偏光板である。位相計917は、参照信号933に対する干渉ビート信号934の位相変化を測定することによって移動鏡906の変位量Dmを求め、その変位量情報を信号940として演算器935に出力する。

【0006】ところで、図14のような光波の干渉による測長を精密（高精度）に行うためには、光路中の空気（またはその他の気体）の屈折率変動を無視することができない。そこで、従来の光波干渉測定装置は、図14に示すように、測定光路中の空気の屈折率変動に起因する測長誤差の補正手段としてエアセンサ932を備えている。すなわち、エアセンサ932を用いて測定光路中の大気温度、圧力、湿度を測定し、この測定結果に基づいて光の波長を補正することによって、空気の屈折率変動に起因する測長誤差を補正している。

【0007】すなわち、真の変位量をDとし、空気の屈折率をnとし、nは空間的に一様であるとする、光波干渉測定装置で測定される変位量Dmは、

$$\text{【数1】 } Dm = nD \cdots (1)$$

と表される。

【0008】ここで、nを光の波長を用いて表すと、

$$\text{【数2】 } Dm = \lambda_0 D / \lambda \cdots (2)$$

となる。但し、 $\lambda = c / \omega$ である。ここで、 λ_0 は真空中の光の波長であり、 λ は測定光路に沿った光の波長である。

【0009】なお、波長 λ は、測定光路中の空気の温度、圧力、湿度に依存する量である。したがって、測定光路に沿った空気の温度、圧力、湿度をエアセンサ932で測定することにより、波長 λ を求めることができる。すなわち、演算器935は、位相計917からの変位Dmの信号940と、エアセンサ932からの温度、圧力、湿度の測定信号941と、式（2）に示す演算式とに基づいて、移動鏡906の真の変位量Dを求めることができる。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】上述のように、従来の技術では、測定光路の1箇所のみにおいて空気の温度、圧力、湿度をエアセンサで検出している。このため、空

気の屈折率が測定光路に沿って一様に変動している場合には正確な補正が可能であるが、空気の屈折率が測定光路上において局所的に変動している場合には、空気の屈折率変動に起因する測長誤差を正確に補正することができないという不都合があった。

【0011】そこで、本発明者等は、特願平7-66469号の明細書および図面において、2つの異なる周波数の光を用いて空気の屈折率変動に起因する測長誤差を補正することの可能な光波干渉測定装置を提案している。なお、特願平7-66469号の明細書および図面に開示された光波干渉測定装置は、本件出願時に未だ公開されておらず、本件出願の従来技術に属していない。

【0012】図13は、特願平7-66469号の明細書および図面に開示の光波干渉測定装置の構成を概略的に示す図である。図13の光波干渉測定装置では、後述する測長用光源1から射出される光と同じ光路上に、2つの異なる周波数 ω_2 （基本波）および ω_3 （第2高調波： $2\omega_2 = \omega_3$ ）のレーザ光を結合させている。こうして、この2つの異なる周波数のレーザ光により、測長用干渉計の光路中での空気（または他の気体等）の屈折率変動を求めることができる。

【0013】図13の光波干渉測定装置では、光源20から射出された周波数 ω_2 の光323の一部が第2高調波発生素子（以下、「SHG変換素子」という）22によって周波数 ω_3 （ $2\omega_2 = \omega_3$ ）の光423にSHG変換され、残りの周波数 ω_2 の光はSHG変換素子22をそのまま透過する。なお、SHG変換素子22を介した周波数 ω_2 の光323および周波数 ω_3 の光423の偏光方位は、測長用光源1から射出される光（後述する光302および402）の偏光方位に対して45°の角度をなしている。周波数 ω_2 の光323および周波数 ω_3 の光423は、たとえばダイクロイックミラーからなる周波数結合素子24によって測長用光源1から射出された周波数 ω_1 の光302および周波数 ω_1' の光402と同一光路上に結合する。結合された光は、同じ光路を介して、偏光ビームスプリッター3に入射する。

【0014】周波数 ω_2 の光323および周波数 ω_3 の光423は、偏光ビームスプリッター3によって、固定鏡5側に反射される光（参照光）と移動鏡7側へ透過する光（測定光）とに分割される。参照光と測定光とは、その偏光方位が互いに直交しているが、いずれも周波数 ω_2 の光および周波数 ω_3 の光をそれぞれ含んでいる。すなわち、参照光は周波数 ω_2 の光326および周波数 ω_3 の光426を含み、測定光は周波数 ω_2 の光327および周波数 ω_3 の光427を含んでいる。

【0015】偏光ビームスプリッター3で反射された参照光は、1/4波長板4を介して固定鏡5で反射された後、1/4波長板4を介して偏光ビームスプリッター3に入射する。偏光ビームスプリッター3を透過した参照光は、コーナーキューブプリズム8で反射された後、偏

光ビームスプリッター3に入射する。偏光ビームスプリッター3を透過した参照光は、1/4波長板4を介して固定鏡5で再び反射された後、1/4波長板4を介して偏光ビームスプリッター3に戻る。一方、偏光ビームスプリッター3を透過した測定光は、1/4波長板6を介して移動鏡7で反射された後、1/4波長板6を介して偏光ビームスプリッター3に入射する。偏光ビームスプリッター3で反射された測定光は、コーナーキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター3に入射する。偏光ビームスプリッター3で反射された測定光は、1/4波長板6を介して移動鏡7で再び反射された後、1/4波長板6を介して偏光ビームスプリッター3に戻る。こうして、参照光（周波数 ω_2 の光326および周波数 ω_3 の光426）および測定光（周波数 ω_2 の光327および周波数 ω_3 の光427）は、偏光ビームスプリッター3に入射して結合され、同一光路に沿って射出される。

【0016】偏光ビームスプリッター3で結合された参照光および測定光は、たとえばダイクロイックミラーからなる周波数分離素子25で反射される。こうして、参照光（周波数 ω_2 の光326および周波数 ω_3 の光426）および測定光（周波数 ω_2 の光327および周波数 ω_3 の光427）は、周波数分離素子25を透過する周波数 ω_1 近傍の光と分離され、偏光ビームスプリッター28に入射する。偏光ビームスプリッター28は、移動鏡7で反射された測定光（周波数 ω_2 の光327および周波数 ω_3 の光427）を透過し、固定鏡5で反射された参照光（周波数 ω_2 の光326および周波数 ω_3 の光426）を反射する。

【0017】偏光ビームスプリッター28を透過した周波数 ω_2 の光327および周波数 ω_3 の光427のうち周波数 ω_2 の光327は、SHG変換素子30によって周波数 ω_3 （ $2\omega_2 = \omega_3$ ）の光331に変換される。一方、周波数 ω_3 の光427は、SHG変換素子30をそのまま透過して周波数 ω_3 の光431となる。その結果、SHG変換素子30によって周波数 ω_2 から周波数 ω_3 に変換された光331と移動鏡7で反射された周波数 ω_3 の光431とが干渉し、その干渉光が受光素子32によって検出される。また、偏光ビームスプリッター28で反射された周波数 ω_2 の光326および周波数 ω_3 の光426についても、SHG変換素子34の作用により、周波数 ω_2 から周波数 ω_3 に変換された光335と固定鏡5で反射された周波数 ω_3 の光435との干渉光が受光素子36で検出される。

【0018】受光素子32および36でそれぞれ検出された干渉信号110および109は、位相計37に入力される。位相計37では、干渉信号109（参照信号）に対する干渉信号110（測定信号）の位相変化を測定する。こうして、周波数 ω_3 の光に対する光路長変化D（ ω_3 ）と周波数 ω_2 の光に対する光路長変化D

(ω_2) との差すなわち $\{D(\omega_3) - D(\omega_2)\}$ を求めることができる。位相計 37 で求められた $\{D(\omega_3) - D(\omega_2)\}$ に関する信号 111 は、演算器 38 に供給される。

【0019】また、図 13 の光波干渉測定装置では、測長用光源 1 は、周波数 ω_1 の光 302 と周波数 ω_1' ($\omega_1' = \omega_1 + \Delta\omega_1$) の光 402 とを含む光を射出する。この 2 つの光は、周波数が互いにわずかに異なり、偏光方位が互いに直交している。

【0020】この 2 つの光は、ビームスプリッター 12 および周波数結合素子 24 を介して偏光ビームスプリッター 3 に入射し、周波数 ω_1' の光 402 と周波数 ω_1 の光 302 とに分離される。周波数 ω_1' の光 402 は参照光となり、1/4 波長板 4、固定鏡 5、1/4 波長板 4、偏光ビームスプリッター 3 およびコーナークューブプリズム 8 を介して偏光ビームスプリッター 3 に戻る。また、周波数 ω_1 の光 302 は測定光となり、1/4 波長板 6、移動鏡 7、1/4 波長板 6、偏光ビームスプリッター 3 およびコーナークューブプリズム 8 を介して、偏光ビームスプリッター 3 に戻る。

【0021】偏光ビームスプリッター 3 に戻ってきた測定光と参照光とは、同一光路に沿って偏光ビームスプリッター 3 から射出される。同一光路に沿って偏光ビームスプリッター 3 から射出された参照光および測定光は、周波数分離素子 25 を透過した後、周波数 ω_1 の光 40

$$D(\omega_1) = [1 + N \cdot F(\omega_1)] \cdot D \dots (3)$$

【数 4】

$$D(\omega_2) = [1 + N \cdot F(\omega_2)] \cdot D \dots (4)$$

【数 5】

$$D(\omega_3) = [1 + N \cdot F(\omega_3)] \cdot D \dots (5)$$

【0025】ここで、D は幾何学的な距離であり、N は空気の密度である。また、F(ω) は、空気の構成比が不変であれば空気の密度に依存することなく光の周波数 ω のみに依存する関数である。上述の式 (3) 乃至

$$D = D(\omega_1) - A [D(\omega_3) - D(\omega_2)] \dots (6)$$

但し、 $A = F(\omega_1) / [F(\omega_3) - F(\omega_2)]$ である。

【0026】式 (6) の右辺第 2 項の $\{D(\omega_3) - D(\omega_2)\}$ は、上述したように、位相計 37 によって求めることができる。また、右辺第 1 項の $D(\omega_1)$ は、位相計 15 によって求めることができる。したがって、演算器 38 では、位相計 15 の出力信号 108 と位相計 37 の出力信号 111 とに基づいて、式 (6) の演算式により、測長用干渉計で測定した変位量 $D(\omega_1)$ を補正し、真の変位量 D を求めることができる。

【0027】図 13 の光波干渉測定装置では、光源 20 からの周波数 ω_2 の光および周波数 ω_3 の光が、測長用光源 1 から射出された測長用の光と同一の光路を通る。このため、空気の屈折率変動が測定光路に沿って一様でない場合も、空気の屈折率変動に起因する測長誤差を補

9 および周波数 ω_1 の光 309 となり、偏光子 10 を介して干渉する。偏光素子 10 を介して生成された干渉光は、受光素子 11 で受光される。受光素子 11 で変換された干渉ビート信号 (周波数 $\Delta\omega_1$) 107 は、位相計 15 に入力される。

【0022】一方、測長用光源 1 から射出された 2 つの光の一部はビームスプリッター 12 によって反射され、偏光素子 13 を介して干渉する。偏光素子 13 を介して生成された干渉光は受光素子 14 によって検出され、参照信号 (周波数 $\Delta\omega_1$) 106 として位相計 15 に入力される。位相計 15 は、参照信号 106 に対する干渉ビート信号 107 の位相変化を測定することによって移動鏡 7 の変位量 $D(\omega_1)$ を求め、その変位量情報を信号 108 として演算器 38 に出力する。

【0023】演算器 38 では、測長用光源 1 を用いた測長用干渉計で測定した移動鏡 7 の変位量 D_m を補正し、真の変位量 (幾何学的な距離) D が求められる。以下、移動鏡 7 の変位量 (ω_1) から真の変位量 (幾何学的な距離) D への補正について説明する。周波数 ω_1 、 ω_2 および ω_3 の光に対する光路長変化 $D(\omega_1)$ 、 $D(\omega_2)$ および $D(\omega_3)$ は、それぞれ次の式 (3) 乃至 (5) により表される。

【0024】

【数 3】

(5) より、幾何学的距離 D は次の式 (6) によって与えられる。

【数 6】

正し、移動鏡の光軸方向の変位量を高精度に測定することができる。

【0028】なお、図 13 の光波干渉測定装置では、コーナークューブプリズム 8 で反射された周波数 ω_2 の光 327 および周波数 ω_3 の光 427 からなる測定光は、偏光ビームスプリッター 3 で反射されるべき光である。また、コーナークューブプリズム 8 で反射された周波数 ω_2 の光 326 および周波数 ω_3 426 の光からなる参照光は、偏光ビームスプリッター 3 を透過すべき光である。

【0029】ところで、偏光ビームスプリッターが周波数の異なる複数の光に対して同様の機能を有するように、すなわち偏光ビームスプリッターが理想的に機能するように構成することおよび製造することは難しい。このため、偏光ビームスプリッター 3 で反射されるべき測

定光の一部が透過して参照光路に混入したり、偏光ビームスプリッター3を透過するべき参照光の一部が反射されて測定光路に混入したりする。その結果、参照光路や測定光路に混入した光が誤差光となって、非線形誤差が発生し、測定精度が低下してしまう。

【0030】なお、結晶タイプの偏光ビームスプリッターは、複数の周波数に対し高い性能を示す。しかしながら、ダブルパス構成の光波干渉測定装置に結晶タイプの偏光ビームスプリッターを用いる場合、ダブルパス構成に基づいて測定光および参照光の偏光状態が変わると結晶の異方性に起因して分離機能が低下してしまう。その結果、参照光路や測定光路に混入した光が誤差光となって、非線形誤差が発生し、測定精度が低下してしまう。

【0031】本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、偏光ビームスプリッターにおいて参照光路や測定光路に混入した誤差光に起因する非線形誤差を低減した、測定精度の高い光波干渉測定装置を提供することを目的とする。

【0032】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本発明において、所定の周波数を有する第1の光と、互いに異なる周波数を有する第2の光および第3の光とを同一光路に沿って出力するための光源部と、前記光源部から出力された前記第1の光乃至前記第3の光を、固定鏡までの参照光路に沿って導かれる第1の偏光状態を有する参照光と、移動鏡までの測定光路に沿って導かれる第2の偏光状態を有する測定光とにそれぞれ偏光分離するための偏光ビームスプリッターと、前記測定光路および前記参照光路を介した前記第1の光に基づいて、前記測定光路を介した測定光と前記参照光路を介した参照光との第1干渉光を生成するための第1干渉光生成系と、前記測定光路を介した前記第2の光および前記第3の光のうち一方の光の周波数を他方の光の周波数とほぼ一致させて第2干渉光を生成するための第2干渉光生成系と、前記参照光路を介した前記第2の光および前記第3の光のうち一方の光の周波数を他方の光の周波数とほぼ一致させて第3干渉光を生成するための第3干渉光生成系と、前記光源部と前記偏光ビームスプリッターとの間の光路中に配置され、前記光源部からの前記第1の光乃至前記第3の光を前記第1の偏光状態を有する光と前記第2の偏光状態を有する光とにそれぞれ偏光分離するとともに、前記第1の偏光状態を有する光と前記第2の偏光状態を有する光とを所定の間隔を隔てた互いに平行な光路に沿って射出するための光分離手段とを備え、前記第1干渉光に基づいて測定された前記移動鏡の変位量を、前記第2干渉光および前記第3干渉光に基づいて測定された前記測定光路中の屈折率変動情報に基づいて補正することを特徴とする光波干渉測定装置を提供する。

【0033】本発明の好ましい態様によれば、前記偏光

ビームスプリッターにおいて前記参照光路に混入した誤差光および前記測定光路に混入した誤差光を除去するための除去手段をさらに備えている。この場合、前記除去手段は、前記偏光ビームスプリッターと前記固定鏡との間の光路中に配置され、所定の参照光路に沿った参照光だけを通過させるための第1空間フィルターと、前記偏光ビームスプリッターと前記移動鏡との間の光路中に配置され、所定の測定光路に沿った測定光だけを通過させるための第2空間フィルターとを有する。

【0034】なお、前記光分離手段は、正レンズと、該正レンズの焦点位置に位置決めされたウォラストンプリズムとを有するか、あるいは偏光ビームスプリッターと全反射プリズム等の反射鏡とを有する。また、本発明の好ましい態様によれば、前記第1干渉光生成系は、互いに平行な光路に沿って前記偏光ビームスプリッターから射出された参照光と測定光とを同一光路上に結合させるための光結合手段をさらに備えている。この場合、前記光結合手段は、正レンズと、該正レンズの焦点位置に位置決めされたウォラストンプリズムとを有するか、あるいは偏光ビームスプリッターと全反射プリズム等の反射鏡とを有する。

【0035】

【発明の実施の形態】本発明の光波干渉測定装置では、互いに異なる周波数を有する2つの光、すなわち周波数 ω_1 の光および周波数 ω_2 の光に基づいて測定光路中の屈折率変動情報を測定する。そして、偏光ビームスプリッターを介して参照光と測定光とに分離されるべき周波数 ω_2 の光および周波数 ω_3 の光を、光分離手段の作用により互いに平行な光路に沿って空間的に分離する。すなわち、偏光ビームスプリッターを介して参照光と測定光とに分離されるべき2つの光を予め平行シフトさせることができるので、測定光路と参照光路とが同一光路上に結合されることなく、互いに空間的に分離される。

【0036】したがって、偏光ビームスプリッターにおいて参照光路や測定光路に混入しても、混入した誤差光の影響を低減することができる。すなわち、混入した誤差光に起因する非線形誤差を低減することができ、精度の高い測定を行うことができる。なお、偏光ビームスプリッターにおいて参照光路に混入した誤差光および測定光路に混入した誤差光を除去するための除去手段を備えることにより、混入した誤差光に起因する非線形誤差をさらに低減することができ、さらに精度の高い測定を行うことができる。

【0037】以下、本発明の実施例を、添付図面に基づいて説明する。図1は、本発明の第1実施例にかかる光波干渉測定装置の構成を概略的に示す図である。なお、第1実施例の光波干渉測定装置では、いわゆるホモダイン干渉方式を用いて屈折率変動の測定を行っている。また、図2は、図1の測長部200の拡大図である。

【0038】図1の光波干渉測定装置は、移動鏡7の光

軸方向（図中矢印方向）の変位量を測長するための光を供給する測長用光源1を備えている。測長用光源1は、たとえば波長633nmのレーザ光を供給するHe-Neレーザである。そして、測長用光源1は、周波数が互いにわずかに異なり且つ偏光方位が互いに直交する2つの直線偏光、すなわち周波数 ω_1 の光302および周波数 ω_1' ($\omega_1' = \omega_1 + \Delta\omega_1$)の光402を同一光路に沿って射出する。以下、周波数 ω_1 の光および周波数 ω_1' の光402をまとめて2周波光という。また、説明の簡略化のために、周波数 ω_1 の光302は紙面に平行な偏光方位を有するP偏光であり、周波数 ω_1' の光402は紙面に垂直な偏光方位を有するS偏光であるものとする。

【0039】測長用光源1から射出された周波数 ω_1 の光302および周波数 ω_1' の光402の一部は、ビームスプリッター12を透過した後、たとえばダイクロイックミラーからなる周波数結合素子24に入射する。周波数結合素子24は、周波数 ω_1 近傍の光を透過し、その他の周波数の光を反射する特性を有する。したがって、周波数結合素子24を透過した周波数 ω_1 の光302および周波数 ω_1' の光402は、光分離素子50に入射する。光分離素子50は、同一光路に沿って入射したP偏光とS偏光とを空間的に分離させ互いに平行な光路に沿って射出する光学素子であって、たとえばビームディスプレースャーからなる。ここで、ビームディスプレースャーは、結晶の異方性を利用して、S偏光の光およびP偏光の光のうち一方の光路をそのまま維持し他方の光路を平行にシフトさせることができる。

【0040】したがって、同一光路に沿って光分離素子50に入射したP偏光302およびS偏光402は、互いに平行な光路122および120に沿って光分離素子50から射出され、偏光ビームスプリッター3に入射する。偏光ビームスプリッター3は、S偏光を反射し、P偏光を透過するように配置されている。したがって、偏光ビームスプリッター3に入射した2周波光のうち周波数 ω_1 の光402は、偏光ビームスプリッター3で反射され、参照光として固定鏡5に導かれる。一方、2周波光のうち周波数 ω_1 の光302は、偏光ビームスプリッター3を透過し、測定光として移動鏡7に導かれる。

【0041】周波数 ω_1' の光402からなる参照光（S偏光）は、空間フィルター52を通過した後、1/4波長板4を介して円偏光の光55となる。円偏光の光55は、固定鏡5で反射された後、1/4波長板4を介してP偏光となる。P偏光となった参照光402は、空間フィルター52を通過した後、偏光ビームスプリッター3に入射する。P偏光状態で偏光ビームスプリッター3を透過した参照光56は、コーナーキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター3に入射する。P偏光状態のまま偏光ビームスプリッター3を透過した参照光56は、空間フィルター52を通過した後、1/

4波長板4を介して円偏光の光57となる。円偏光の光57は、固定鏡5で反射された後、1/4波長板4を介してS偏光となる。S偏光となった参照光402は、空間フィルター52を通過した後、偏光ビームスプリッター3に入射する。S偏光状態で偏光ビームスプリッター3において反射された参照光58は、光路120に沿って測長部200から射出される。

【0042】一方、周波数 ω_1 の光302からなる測定光（P偏光）は、空間フィルター53を通過した後、1/4波長板6を介して円偏光の光60となる。円偏光の光60は、移動鏡7で反射された後、1/4波長板6を介してS偏光となる。S偏光となった測定光302は、空間フィルター53を通過した後、偏光ビームスプリッター3に入射する。S偏光状態で偏光ビームスプリッター3において反射された測定光61は、コーナーキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター3に入射する。S偏光状態のまま偏光ビームスプリッター3で反射された測定光61は、空間フィルター53を通過した後、1/4波長板6を介して円偏光の光62となる。円偏光の光62は、移動鏡7で反射された後、1/4波長板6を介してP偏光となる。P偏光となった測定光302は、空間フィルター53を通過した後、偏光ビームスプリッター3に入射する。P偏光状態で偏光ビームスプリッター3を透過した測定光63は、光路122に沿って測長部200から射出される。

【0043】こうして、参照光路を介して偏光ビームスプリッター3から射出された周波数 ω_1' の光402と、測定光路を介して偏光ビームスプリッター3から射出された周波数 ω_1 の光302とは、互いに異なる光路120および122に沿って周波数分離素子25に入射する。周波数分離素子25は、周波数が ω_1 近傍の光のみを透過し、他の周波数の光を反射する特性を有する。したがって、周波数 ω_1' の参照光402および周波数 ω_1 の測定光302は、周波数分離素子25を透過する。周波数分離素子25を透過した周波数 ω_1' の参照光402および周波数 ω_1 の測定光302は、光結合素子51に入射する。光結合素子51は、互いに平行な光路に沿って入射したP偏光とS偏光とを結合させて同一光路に沿って射出する光学素子であって、たとえば光分離素子50を光の進行方向に対して反対に配置することによって構成することができる。

【0044】したがって、互いに平行な光路120および122に沿って光結合素子51に入射したP偏光302とS偏光402とは、同一光路上に結合された後、周波数 ω_1 の測定光309および周波数 ω_1' の参照光409となって光結合素子51から射出される。光結合素子51から射出された周波数 ω_1' の参照光409と周波数 ω_1 の測定光309とは、偏光素子10を介して干渉する。なお、偏光素子10は、たとえば2周波光の偏光方位に対して45°だけ傾いて配置された偏光板から構成

されている。偏光素子10を介して生成された干渉光は受光素子11で受光され、受光素子11は干渉光に基づく測定ビート信号(周波数 $\Delta\omega_1$)107を位相計15に供給する。

【0045】一方、測長用光源1から射出された2周波光すなわち周波数 ω_1' の光402および周波数 ω_1 の光302の一部は、ビームスプリッター12によって反射された後、偏光素子13に入射する。なお、偏光素子13は、偏光素子10と同様に、2周波光を干渉させるための偏光板である。したがって、偏光素子13を介して生成された周波数 ω_1' の光402と周波数 ω_1 の光302との干渉光は、受光素子14によって検出される。受光素子14は、周波数 ω_1' の光402と周波数 ω_1 の光302との干渉光に基づく参照信号(周波数 $\Delta\omega_1$)106を位相計15に供給する。位相計15では、参照信号106に対する測定ビート信号107の位相変化を測定することによって屈折率変動の影響を考慮していない移動鏡7の変位量D(ω_1)を求め、この変位量D(ω_1)に関する信号108を演算器38に供給する。

【0046】図1の光波干渉測定装置はまた、屈折率変動を測定するための光として、たとえば波長1064nmのYAGレーザ光を供給する光源20を備えている。光源20から射出された周波数 ω_2 の直線偏光の光323はSHG変換素子22に入射し、周波数 ω_2 の光323の一部がSHG変換素子22により周波数 ω_3 ($\omega_3=2\omega_2$)の光423にSHG変換され、残りの周波数 ω_2 の光はSHG変換素子22をそのまま透過する。なお、SHG変換素子22は、たとえば非線形光学材料KTiPO₄により構成することができる。

【0047】SHG変換素子22から射出された周波数 ω_2 の光323および周波数 ω_3 の光423は、周波数結合素子24によって反射され、測長用光源1からの光(周波数 ω_1 近傍の光)と同一光路上に結合される。なお、前述したように、周波数結合素子24は、周波数 ω_1 近傍の光のみを透過し、それ以外の周波数の光を反射する特性を有する。このように、光源20およびSHG変換素子22は、互いに周波数の異なる2つの光を同一光路に沿って出力する光源部201を構成している。

【0048】周波数結合素子24で反射された周波数 ω_2 の光323および周波数 ω_3 の光423は、光分離素子50に入射する。光分離素子50に入射した周波数 ω_2 の光323および周波数 ω_3 の光423のうちP偏光成分54(周波数 ω_2 の光323aおよび周波数 ω_3 の光423a)は光路122に沿って光分離素子50から射出され、偏光ビームスプリッター3に入射する。また、光分離素子50に入射した周波数 ω_2 の光323および周波数 ω_3 の光423のうちS偏光成分59(周波数 ω_2 の光323bおよび周波数 ω_3 の光423b)は光路122と平行な別の光路120に沿って光分離素子50から射出され、偏光ビームスプリッター3に入射す

る。

【0049】前述したように、偏光ビームスプリッター3は、S偏光を反射し、P偏光を透過するように配置されている。したがって、光路120に沿ってS偏光状態で偏光ビームスプリッター3に入射した周波数 ω_2 の光323bおよび周波数 ω_3 の光423bは、偏光ビームスプリッター3で反射され、参照光として固定鏡5に導かれる。一方、光路122に沿ってP偏光状態で偏光ビームスプリッター3に入射した周波数 ω_2 の光323aおよび周波数 ω_3 の光423aは、偏光ビームスプリッター3を透過し、測定光として移動鏡7に導かれる。

【0050】周波数 ω_2 の光323bおよび周波数 ω_3 の光423bからなる参照光(S偏光)は、空間フィルター52を通過した後、1/4波長板4を介して円偏光の光55となる。円偏光の光55は、固定鏡5で反射された後、1/4波長板4を介してP偏光となる。P偏光となった参照光323bおよび423bは、空間フィルター52を通過した後、偏光ビームスプリッター3に入射する。P偏光状態で偏光ビームスプリッター3を透過した参照光56は、コーナーキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター3に入射する。P偏光状態のまま偏光ビームスプリッター3を透過した参照光56は、空間フィルター52を通過した後、1/4波長板4を介して円偏光の光57となる。円偏光の光57は、固定鏡5で反射された後、1/4波長板4を介してS偏光となる。S偏光となった参照光323bおよび423bは、空間フィルター52を通過した後、偏光ビームスプリッター3に入射する。S偏光状態で偏光ビームスプリッター3において反射された参照光58は、光路120に沿って測長部200から射出される。

【0051】一方、周波数 ω_2 の光323aおよび周波数 ω_3 の光423aからなる測定光(P偏光)は、空間フィルター53を通過した後、1/4波長板6を介して円偏光の光60となる。円偏光の光60は、移動鏡7で反射された後、1/4波長板6を介してS偏光となる。S偏光となった測定光323aおよび423aは、空間フィルター53を通過した後、偏光ビームスプリッター3に入射する。S偏光状態で偏光ビームスプリッター3において反射された測定光61は、コーナーキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター3に入射する。S偏光状態のまま偏光ビームスプリッター3で反射された測定光61は、空間フィルター53を通過した後、1/4波長板6を介して円偏光の光62となる。円偏光の光62は、移動鏡7で反射された後、1/4波長板6を介してP偏光となる。P偏光となった測定光323aおよび423aは、空間フィルター53を通過した後、偏光ビームスプリッター3に入射する。P偏光状態で偏光ビームスプリッター3を透過した測定光63は、光路122に沿って測長部200から射出される。

【0052】このように、周波数 ω_2 の光および周波数 ω_3 の光からなる測定光および参照光は、前述した周波数 ω_1 近傍の光からなる測定光および参照光と同じ測定光路および参照光路を介して測長部200から射出される。こうして、参照光路を介して偏光ビームスプリッター3から射出された周波数 ω_2 の光323bおよび周波数 ω_3 の光423bと、測定光路を介して偏光ビームスプリッター3から射出された周波数 ω_2 の光323aおよび周波数 ω_3 の光423aとは、互いに異なる光路120および122に沿って周波数分離素子25に入射する。周波数分離素子25は、前述したように、周波数が ω_1 近傍の光のみを透過し、他の周波数の光を反射する特性を有する。したがって、周波数 ω_2 の光および周波数 ω_3 の光からなる測定光および参照光は、周波数分離素子25でそれぞれ反射される。

【0053】周波数分離素子25で反射された周波数 ω_2 の光および周波数 ω_3 の光、すなわち参照光路を介した周波数 ω_2 の光326および周波数 ω_3 の光426と、測定光路を介した周波数 ω_2 の光327および周波数 ω_3 の光427とは、互いに異なる光路に沿って偏光ビームスプリッター28に入射する。偏光ビームスプリッター28は、P偏光状態の測定光（周波数 ω_2 の光327および周波数 ω_3 の光427）を透過し、S偏光状態の参照光（周波数 ω_2 の光326および周波数 ω_3 の光426）を反射する。偏光ビームスプリッター28とSHG変換素子30との間に前述の空間フィルターを挿入すると、参照光が測定光用のSHG変換素子30に向かわないようにすることができる。同様に、偏光ビームスプリッター28とSHG変換素子34との間に空間フィルターを挿入すると、測定光が参照光用のSHG変換素子34に向かわないようにすることができる。

【0054】偏光ビームスプリッター28を透過した周波数 ω_2 の光327および周波数 ω_3 の光427のうち周波数 ω_2 の光327は、SHG変換素子30によって周波数 ω_3 （ $2\omega_2 = \omega_3$ ）の光331に変換される。一方、周波数 ω_3 の光427は、SHG変換素子30をそのまま透過して周波数 ω_3 の光431となる。その結果、SHG変換素子30によって周波数 ω_2 から周波数 ω_3 に変換された光331と移動鏡7で反射された周波数 ω_3 の光431とが干渉し、その干渉光が受光素子32によって検出される。また、偏光ビームスプリッター28で反射された周波数 ω_2 の光326および周波数 ω_3 の光426についても、SHG変換素子34の作用により、周波数 ω_2 から周波数 ω_3 に変換された光335と固定鏡5で反射された周波数 ω_3 の光435との干渉光が受光素子36で検出される。

【0055】受光素子32および36でそれぞれ検出された干渉信号110および109は、位相計37に入力される。位相計37では、干渉信号109（参照信号）に対する干渉信号110（測定信号）の位相変化を測定

する。こうして、周波数 ω_3 の光に対する光路長変化 $D(\omega_3)$ と周波数 ω_2 の光に対する光路長変化 $D(\omega_2)$ との差すなわち $\{D(\omega_3) - D(\omega_2)\}$ を求めることができる。位相計37で求められた $\{D(\omega_3) - D(\omega_2)\}$ に関する信号111は、演算器38に供給される。演算器38では、位相計15からの信号108と位相計37からの信号111と式(6)に示す演算式に基づいて、屈折率変動に起因する測定誤差を補正した移動鏡7の真の変位量 D を、ひいては移動鏡7が固定された移動台の真の変位量 D を求めて出力する。

【0056】以上のように、第1実施例では、偏光ビームスプリッター3を介して参照光と測定光とに分離されるべき2つの光が、光分離素子50の作用により互いに平行な光路に沿って空間的に分離される。すなわち、偏光ビームスプリッター3を介して参照光と測定光とに分離されるべき2つの光を予め平行シフトすることにより、測定光路と参照光路とが同一光路上に結合されることなく、互いに空間的に分離される。その結果、コーナーキューブプリズム8で反射された周波数 ω_2 の光323aおよび周波数 ω_3 の光423aからなる測定光61は本来偏光ビームスプリッター3で反射されるべきであるが、仮に測定光61の一部が偏光ビームスプリッター3を透過して参照光路に混入しても、混入した誤差光は空間フィルター52に遮られる。

【0057】また、コーナーキューブプリズム8で反射された周波数 ω_2 の光323bおよび周波数 ω_3 の光423bからなる参照光56は本来偏光ビームスプリッター3を透過すべきであるが、仮に参照光56の一部が偏光ビームスプリッター3で反射されて測定光路に混入しても、混入した誤差光は空間フィルター53に遮られる。なお、移動鏡7で2回反射された周波数 ω_2 の光323aおよび周波数 ω_3 の光423aからなる測定光は本来偏光ビームスプリッター3を透過すべきであるが、この測定光の一部が偏光ビームスプリッター3で反射されることがある。この場合、測定光の一部がコーナーキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター3を透過して参照光路に混入しても、混入した誤差光は空間フィルター52に遮られる。

【0058】また、固定鏡5で2回反射された周波数 ω_2 の光323bおよび周波数 ω_3 の光423bからなる参照光は本来偏光ビームスプリッター3で反射されるべきであるが、この参照光の一部が偏光ビームスプリッター3を透過することがある。この場合、参照光の一部がコーナーキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター3で反射されて測定光路に混入しても、混入した誤差光は空間フィルター53に遮られる。このように、第1実施例では、偏光ビームスプリッター3において参照光路や測定光路に混入した誤差光に起因する非線形誤差を低減して、ダブルパス構成による精度の高い測定を行うことができる。

【0059】なお、上述の第1実施例では、周波数分離素子25を光結合素子51よりも偏光ビームスプリッター3側に配置している。しかしながら、光結合素子51を周波数分離素子25よりも偏光ビームスプリッター3側に配置することもできる。また、上述の第1実施例では、偏光ビームスプリッター3と空間フィルター52および53とを別体に構成している。しかしながら、偏光ビームスプリッター3の対応する面の一部を粗面に形成し、偏光ビームスプリッターと空間フィルターとを一体的に構成してもよい。

【0060】さらに、上述の第1実施例において光分離素子50の平行シフト量に周波数依存性があると、屈折率変動測定用の光と測長用の光との間で平行シフト量に差異が生じる。この場合、所定の特性を有するガラス等を配置することにより、平行シフト量の補正が可能である。

【0061】図3は、本発明の第2実施例にかかる光波干渉測定装置の構成を概略的に示す図である。なお、第2実施例の光波干渉測定装置では、いわゆるヘテロダイン干渉方式を用いて屈折率変動の測定を行っている。

【0062】図3の光波干渉測定装置では、ヘテロダイン方式を用いて周波数 ω_2 の光と周波数 ω_3 の光との干渉光を検出するために、SHG変換素子22と周波数結合素子24との間に周波数フィルター64、67および周波数シフター66を付設している。しかしながら、図3の装置の他の構成は、第1実施例の図1の装置と基本的に同じである。したがって、図3において、第1実施例の構成要素と同様の機能を有する要素には図1と同じ参照符号を付している。以下、第1実施例との相違点に着目して、第2実施例を説明する。

【0063】SHG変換素子22から射出された周波数 ω_2 の光368および周波数 ω_3 の光465は、周波数フィルタ64に入射する。周波数フィルタ64および67は、周波数 ω_3 の近傍の光を反射し、周波数 ω_2 の光を透過する特性を有する。周波数フィルタ64で反射された周波数 ω_3 の光465は、周波数シフター66を介して周波数 ω_3 からわずかに周波数のずれた周波数 ω_3' の光($\omega_3' = \omega_3 + \Delta\omega_3$)469となる。なお、周波数シフター66は、例えば音響光学素子等である。周波数シフター66を介した周波数 ω_3' の光は、周波数フィルタ67に入射する。

【0064】一方、周波数フィルタ64を透過した周波数 ω_2 の光368は、そのまま周波数フィルタ67に入射する。こうして、周波数 ω_3' の光469および周波数 ω_2 の光368は、周波数フィルタ67の作用によって再び同一光路上に結合される。その後、結合された周波数 ω_2 の光368および周波数 ω_3' の光469は、第1実施例における周波数 ω_2 の光323および周波数 ω_3 の光423と同様の光路を介した後、周波数分離素子25によって測定光および参照光として反射される。

【0065】周波数 ω_2 の光371および周波数 ω_3' の光471からなる測定光のうち、周波数 ω_2 の光371はSHG変換素子30によって変換されて周波数 ω_3 の光373となり、周波数 ω_3' の光471はSHG変換素子30をそのまま透過して周波数 ω_3' の光473となる。このように、第1実施例とは異なり、周波数が互いに $\Delta\omega_3$ だけ異なる2つの光すなわち周波数 ω_3 の光373と周波数 ω_3' の光473とがヘテロダイン干渉する。また、周波数 ω_2 の光370および周波数 ω_3' の光470からなる参照光も同様に、SHG変換素子34を介して、周波数が互いに $\Delta\omega_3$ だけ異なる2つの光すなわち周波数 ω_3 の光372と周波数 ω_3' の光472となり、ヘテロダイン干渉する。

【0066】従って、受光素子36からの参照信号109および受光素子32からの測定信号110は、ともに干渉ビート信号となる。位相計37では、第1実施例と同様に、 $\{D(\omega_3') - D(\omega_2)\}$ を求め、この値に関する信号111を演算器38に供給する。演算器38では、位相計15からの信号108と位相計37からの信号111と式(6)に示す演算式に基づいて、屈折率変動に起因する測定誤差を補正した移動鏡7の真の変位量Dを求めて出力する。

【0067】このように、第2実施例の光波干渉測定装置においても、偏光ビームスプリッター3において参照光路や測定光路に混入した誤差光に起因する非線形誤差を低減して、ダブルパス構成による精度の高い測定を行うことができる。また、第2実施例では、周波数 ω_2 の光と周波数 ω_3 の光とを用いた屈折率変動測定をヘテロダイン干渉方式で行っている。このため、光源20の出力の変動による誤差を受けにくく、位相差 $\{D(\omega_3) - D(\omega_2)\}$ を正確に検出することができる。その結果、真の変位量Dの検出精度を向上させることができる。

【0068】図4乃至図6は、第1実施例における光分離結合部202（光分離素子50および光結合素子51）の変形例の構成を概略的に示す図である。図4に示す変形例では、正レンズ77とその焦点位置に配置されたウォラストンプリズム76とを組み合わせる光分離素子を構成している。また、正レンズ79とその焦点位置に配置されたウォラストンプリズム78とを組み合わせる光結合素子を構成している。

【0069】ウォラストンプリズムは、同一光路に沿って入射したP偏光とS偏光とを所定の分離角度で分離させる作用を有する光学素子である。したがって、ウォラストンプリズム76に同一光路に沿って入射したP偏光とS偏光とは、所定の分離角度で分離された後、正レンズ77の作用によって互いに平行な光路に沿って光分離結合部202から射出される。同様に、正レンズ79とウォラストンプリズム78との組み合わせにより、互いに平行な光路に沿って入射したP偏光とS偏光とを、同

一光路上に結合して光分離結合部202から射出することもできる。

【0070】なお、図4のウォラストンプリズム76の分離角度に周波数依存性があると、周波数の大きく異なる2つの光の分離角度に差異が生じ、正レンズ77を介した2つの光の平行性が崩れてしまう。この場合、図5に示すように、正レンズ77の後側（偏光ビームスプリッター3側）に分散ガラス80を配置することにより、ウォラストンプリズム76の分離角度に周波数依存性がある場合にも正レンズ77を介した2つの光の平行性を維持することができる。この場合、正レンズ79の前側（偏光ビームスプリッター3側）にも、分散ガラス81を配置することが必要である。さらに、分散ガラス80を使用しなくても、正レンズにウォラストンプリズムの周波数依存性に応じた色収差を付けて平行性を維持することもできる。

【0071】また、図6に示す変形例では、偏光ビームスプリッター82と全反射プリズム582とを組み合わせ、光分離素子を構成している。また、偏光ビームスプリッター83と全反射プリズム583とを組み合わせ、光結合素子を構成している。なお、図6において、全反射プリズム582および583を他の反射鏡と置換してもよい。また、偏光ビームスプリッター82および83は、結晶タイプであっても膜タイプであってもよい。

【0072】図7乃至図9は、第1実施例における測長部200の変形例の構成を概略的に示す図である。図7の測長部200は、第1実施例における測長部200と類似している。しかしながら、重複誤差光の影響を低減するために、偏光ビームスプリッター84、偏光ビームスプリッター85およびコーナキューブプリズム87を付設している点だけが第1実施例と相違する。したがって、図7において、第1実施例の構成要素と同様の機能を有する要素には図1と同じ参照符号を付している。以下、第1実施例との相違点に着目して、図7の変形例を説明する。

【0073】まず、図1を再び参照して、重複誤差光の影響について説明する。図1において、移動鏡7で2回反射された周波数 ω_2 の光323aおよび周波数 ω_3 の光423aからなる測定光は本来偏光ビームスプリッター3を透過すべきであるが、偏光ビームスプリッター3の製造上の性能の不完全さによって、この測定光の一部が偏光ビームスプリッター3で反射されることがある。この場合、測定光の一部がコーナキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター3で反射されて重複誤差光となる。この重複誤差光は、測定光路をさらに2往復（結果的には4往復）してしまう。その結果、重複誤差光に起因して非線形誤差が発生し、精度の高い測定を行うことができなくなってしまう。

【0074】また、図1において、固定鏡5で2回反射された参照光は本来偏光ビームスプリッター3で反射さ

れるべきであるが、この参照光の一部が偏光ビームスプリッター3を透過することがある。この場合、参照光の一部がコーナキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター3を透過して重複誤差光となる。この重複誤差光は、参照光路をさらに2往復（結果的には4往復）してしまう。その結果、重複誤差光に起因して非線形誤差が発生し、精度の高い測定を行うことができなくなってしまう。そこで、図7の変形例では、重複誤差光の影響を低減するために、偏光ビームスプリッター84、偏光ビームスプリッター85およびコーナキューブプリズム87を付設している。

【0075】したがって、図7の変形例では、偏光ビームスプリッター3で反射された参照光は、空間フィルター52および1/4波長板4を介して固定鏡5で反射された後、1/4波長板4および空間フィルター52を介して偏光ビームスプリッター3に戻る。偏光ビームスプリッター3を透過した参照光は、偏光ビームスプリッター84を介してコーナキューブプリズム8で反射された後、偏光ビームスプリッター84を介して偏光ビームスプリッター3に入射する。偏光ビームスプリッター3を透過した参照光は、空間フィルター52および1/4波長板4を介して固定鏡5で再び反射された後、1/4波長板4および空間フィルター52を介して偏光ビームスプリッター3に戻る。

【0076】一方、偏光ビームスプリッター3を透過した測定光は、空間フィルター53および1/4波長板6を介して移動鏡7で反射された後、1/4波長板6および空間フィルター53を介して偏光ビームスプリッター3に戻る。偏光ビームスプリッター3で反射された測定光は、偏光ビームスプリッター84および85を介してコーナキューブプリズム87で反射された後、偏光ビームスプリッター85および84を介して偏光ビームスプリッター3に入射する。偏光ビームスプリッター3で反射された測定光は、空間フィルター53および1/4波長板6を介して移動鏡7で再び反射された後、1/4波長板6および空間フィルター53を介して偏光ビームスプリッター3に戻る。

【0077】移動鏡7までの測定光路を2往復して偏光ビームスプリッター3に戻った測定光から生じる重複誤差光は、偏光ビームスプリッター3、84および85を本来透過すべき成分である。したがって、重複誤差光の大部分は偏光ビームスプリッター84を透過する。偏光ビームスプリッター84を透過した重複誤差光は、進むべき光路を失うので影響がなくなる。仮に、偏光ビームスプリッター84を透過した重複誤差光がコーナキューブプリズム8で反射されて測定精度に影響を及ぼす場合には、参照光のみが通過可能な空間フィルター584を付設して、重複誤差光の悪影響を防ぐことができる。

【0078】なお、偏光ビームスプリッター84の性能もまた完全ではないため、重複誤差光の一部が偏光ビー

ムスプリッター84で反射されてしまう。しかしながら、偏光ビームスプリッター84で反射された重複誤差光の大部分は、偏光ビームスプリッター85を透過し、進むべき光路を失うので影響がなくなる。さらに、重複誤差光の一部が偏光ビームスプリッター85で反射された場合でも、コーナーキューブプリズム87で反射されて、偏光ビームスプリッター85に再び入射する。その結果、重複誤差光の大部分は、偏光ビームスプリッター85を透過し、進むべき光路を失うので影響がなくなる。

【0079】同様に、固定鏡5までの参照光路を2往復して偏光ビームスプリッター3に戻った参照光から生じる重複誤差光は、偏光ビームスプリッター3、84および85で本来反射されるべき成分である。したがって、重複誤差光の大部分は偏光ビームスプリッター84で反射される。偏光ビームスプリッター84で反射された重複誤差光は、偏光ビームスプリッター85を透過する。偏光ビームスプリッター85を透過した重複誤差光は、進むべき光路を失うので影響がなくなる。仮に、偏光ビームスプリッター85で反射された重複誤差光がコーナーキューブプリズム87で反射されて測定精度に影響を及ぼす場合には、測定光のみが通過可能な空間フィルタ585を付設して、重複誤差光の悪影響を防ぐことができる。

【0080】なお、偏光ビームスプリッター84の性能もまた完全ではないため、重複誤差光の一部が偏光ビームスプリッター84を透過してしまう。しかしながら、偏光ビームスプリッター84を透過した重複誤差光の大部分は、コーナーキューブプリズム87で反射されて、偏光ビームスプリッター84に再び入射する。その結果、重複誤差光の大部分は、偏光ビームスプリッター84で反射され、進むべき光路を失うので影響がなくなる。

【0081】このように、参照光路や測定光路を2往復して偏光ビームスプリッター3に戻った参照光や測定光から重複誤差光が生じても、3つの偏光ビームスプリッター3、84および85の作用により、重複誤差光を順次低減することができる。すなわち、重複誤差光に起因する非線形誤差を低減して、ダブルパス構成による精度の高い測定を行うことができる。また、偏光ビームスプリッター84、85を付加したように、偏光ビームスプリッター84、85の後ろ側（コーナーキューブプリズム側）にさらに偏光ビームスプリッターを順次接続していけば、誤差光をさらに低減することができるので、より高精度な測定をすることができる。

【0082】図8の測長部200は図7の変形例における測長部200と類似しているが、移動鏡の反射面と固定鏡の反射面とが互いに平行になるように構成されている点だけが基本的に相違する。したがって、図8において、図7の変形例の構成要素と同様の機能を有する要素には図7と同じ参照符号を付している。以下、図7の変

形例との相違点に着目して、図8の変形例を説明する。

【0083】図8の変形例では、参照光路中において1/4波長板4と固定鏡89との間に反射鏡88を付設し、固定鏡89の反射面と移動鏡7の反射面とが互いに平行になるように構成している。なお、反射鏡88に代えて、全反射プリズムを用いてもよい。例えば、半導体素子や液晶表示素子の製造のための露光装置（リソグラフィステッパー）の2次元ステージの位置を検出するための光波干渉測定装置に本発明を適用する場合、2次元ステージに固定された移動鏡の反射面と投影光学系に固定された固定鏡の反射面とを平行にする必要がある。したがって、図8の変形例に示す測長部200の構成は、たとえば露光装置に適している。

【0084】図9の測長部200は第1実施例における測長部200と類似しているが、測定光路および参照光路において1/4波長板と空間フィルタとの配置が逆になっている点だけが基本的に相違する。なお、図3、図7および図8においても、測定光路および参照光路の少なくとも一方において、1/4波長板と空間フィルタとの配置を逆にする構成が可能である。

【0085】図10乃至図12は、図3の第2実施例における光源部201の変形例の構成を概略的に示す図である。図10の変形例では、図3の周波数シフター66に代えて、周波数フィルタ64と67との間に周波数シフター199を設けている。したがって、図10の変形例では、周波数 ω_3 の光92を周波数シフトすることなく、周波数 ω_2 の光90だけを周波数 ω_2' の光91に周波数シフトしている。

【0086】また、図11の変形例では、図3の周波数シフター66に対応する周波数シフター191に加えて、2つの周波数フィルタ64と67との間に周波数シフター192を付設している。したがって、図10の変形例では、周波数 ω_3 の光92を周波数 ω_3' の光95に周波数シフトするとともに、周波数 ω_2 の光90を周波数 ω_2' の光94に周波数シフトしている。

【0087】図12の変形例では、周波数 ω_2 の光90および周波数 ω_3 の光92をそれぞれの別の光路に沿って射出する光源97を備えている。周波数 ω_3 の光92は、周波数シフター193の作用により、周波数 ω_3' の光98に周波数シフトされる。周波数 ω_3 の光92および周波数 ω_3' の光98は、周波数フィルタ67を介して同一光路上に結合される。

【0088】なお、図12の変形例では、周波数 ω_3 の光だけを周波数 ω_3' の光に周波数シフトしている。しかしながら、図10のように周波数 ω_2 の光だけを周波数 ω_2' の光に周波数シフトしてもよいし、図11のように周波数 ω_2 の光および周波数 ω_3 の光を周波数 ω_2' の光および周波数 ω_3' の光に周波数シフトしてもよい。また、第1実施例のようにホモダイン方式で屈折率変動を測定する場合には、周波数変調を行うことなく、周波数

ω_2 の光 90 と周波数 ω_3 の光 92 とを周波数フィルター 67 を介して同一光路上に結合すればよい。

【0089】なお、上述の各実施例では、屈折率変動の測定に際して、周波数 ω_2 の光と ω_2 の 2 倍の周波数を有する周波数 ω_3 の光とを用いている。しかしながら、本発明では、参照光路および測定光路を通った互いに周波数の異なる 2 つの光のうち一方の光の周波数を他方の光の周波数とほぼ一致させることによって干渉させることが重要である。したがって、例えば、高調波変換素子を用いて、第 3 高調波やそれ以上の高次の光を用いて、屈折率変動の測定を行っても良い。

【0090】また、上述の各実施例では、測長用光源 1 が偏光方位が互いに直交し且つ周波数が互いにわずかに異なる 2 つの光を射出し、この 2 周波光に基づいて移動鏡 7 の変位をヘテロダイン干渉方式を用いて測定している。しかしながら、測長用光源からの単一の周波数を有する光に基づいて、ホモダイン干渉方式により移動鏡 7 の変位を測定しても良い。

【0091】

【効果】以上説明したように、本発明によれば、偏光ビームスプリッターを介して参照光と測定光とに分離されるべき 2 つの光を予め平行シフトするので、測定光路と参照光路とが同一光路上に結合されることなく、互いに空間的に分離される。その結果、偏光ビームスプリッターにおいて参照光路や測定光路に混入しても、混入した誤差光の影響を低減することができる。また、偏光ビームスプリッターにおいて参照光路に混入した誤差光および測定光路に混入した誤差光を除去するための除去手段を備えることにより、混入した誤差光に起因する非線形誤差をさらに低減することができ、さらに精度の高い測定を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の第 1 実施例にかかる光波干渉測定装置の構成を概略的に示す図である。

【図 2】図 1 の測長部 200 の拡大図である。

【図 3】本発明の第 2 実施例にかかる光波干渉測定装置の構成を概略的に示す図である。

【図 4】第 1 実施例における光分離結合部 202（光分離素子 50 および光結合素子 51）の変形例の構成を概略的に示す図である。

【図 5】第 1 実施例における光分離結合部 202（光分離素子 50 および光結合素子 51）の変形例の構成を概

略的に示す図である。

【図 6】第 1 実施例における光分離結合部 202（光分離素子 50 および光結合素子 51）の変形例の構成を概略的に示す図である。

【図 7】第 1 実施例における測長部 200 の変形例の構成を概略的に示す図である。

【図 8】第 1 実施例における測長部 200 の変形例の構成を概略的に示す図である。

【図 9】第 1 実施例における測長部 200 の変形例の構成を概略的に示す図である。

【図 10】図 3 の第 2 実施例における光源部 201 の変形例の構成を概略的に示す図である。

【図 11】図 3 の第 2 実施例における光源部 201 の変形例の構成を概略的に示す図である。

【図 12】図 3 の第 2 実施例における光源部 201 の変形例の構成を概略的に示す図である。

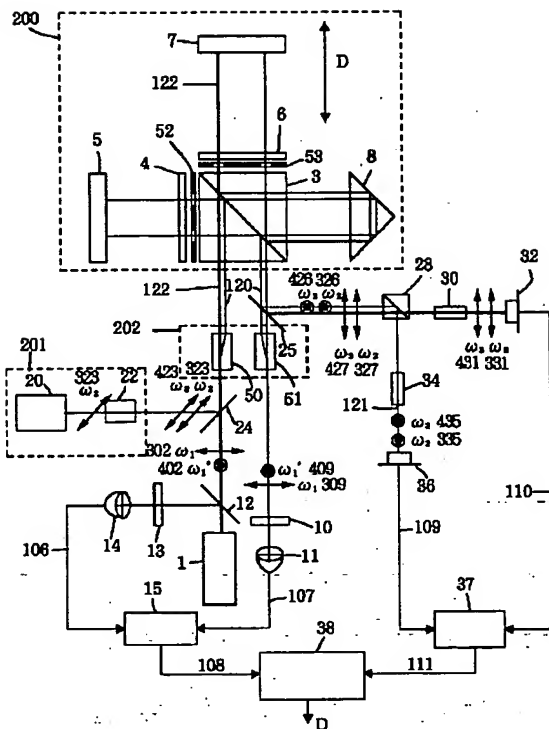
【図 13】特願平 7-66469 号明細書および図面に開示の光波干渉測定装置の構成を概略的に示す図である。

【図 14】従来の光波干渉測定装置の構成を概略的に示す図である。

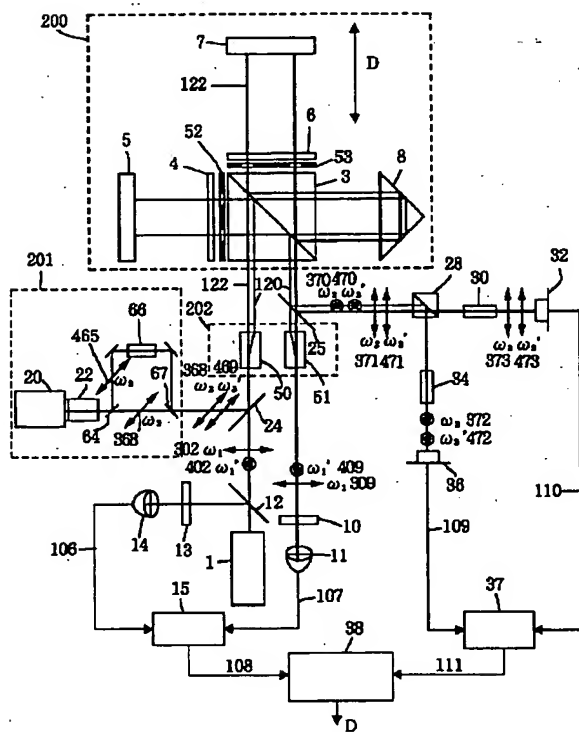
【符号の説明】

| | |
|----------|--------------|
| 1、20 | 光源 |
| 3、28 | 偏光ビームスプリッター |
| 4、6 | 1/4 波長板 |
| 5 | 固定鏡 |
| 7 | 移動鏡 |
| 8 | コーナーキューブプリズム |
| 10、13 | 偏光板 |
| 11、14 | 受光素子 |
| 12 | ビームスプリッター |
| 15、37 | 位相計 |
| 21、23 | 周波数フィルター |
| 22、30、34 | SHG 変換素子 |
| 24 | 周波数結合素子 |
| 25 | 周波数分離素子 |
| 32、36 | 受光素子 |
| 38 | 演算器 |
| 50 | 光結合素子 |
| 51 | 光分離素子 |
| 52、53 | 空間フィルター |
| 66 | 音響光学素子 |

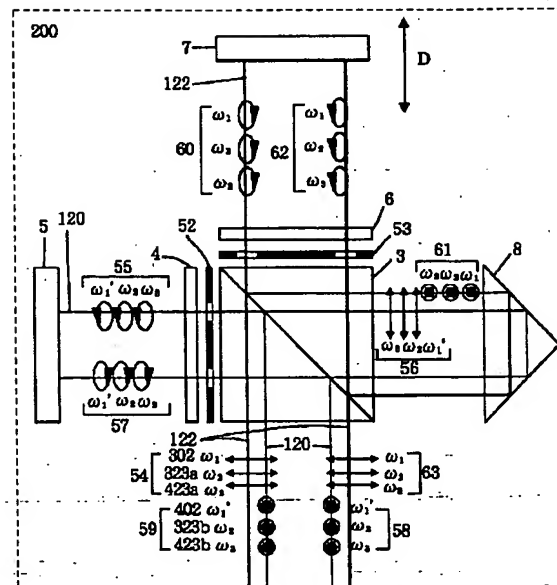
【图1】



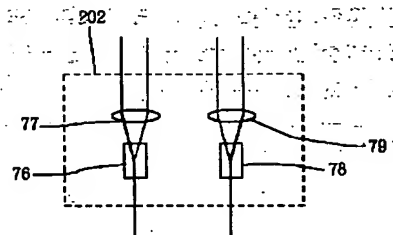
【图3】



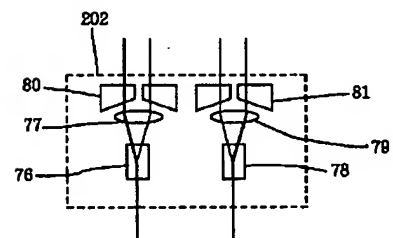
【图2】



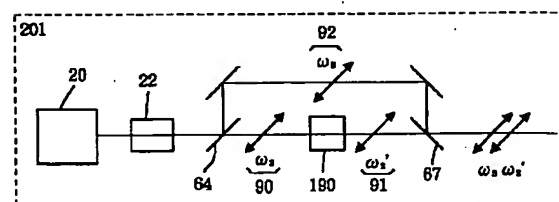
【图4】



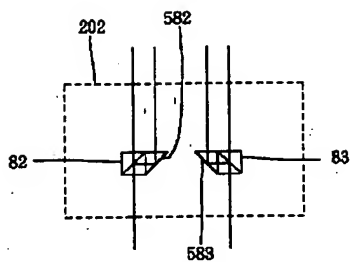
【图5】



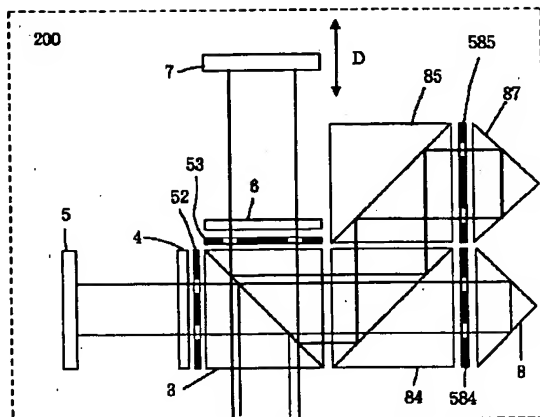
【图10】



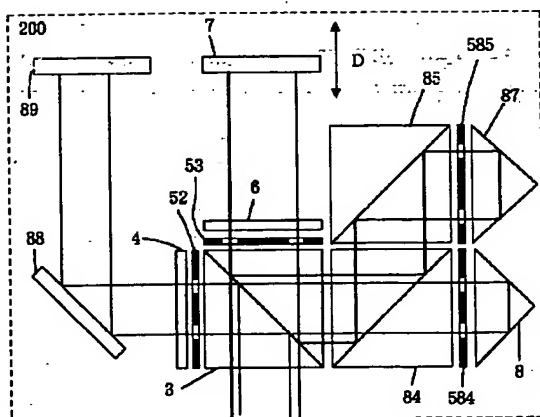
【図6】



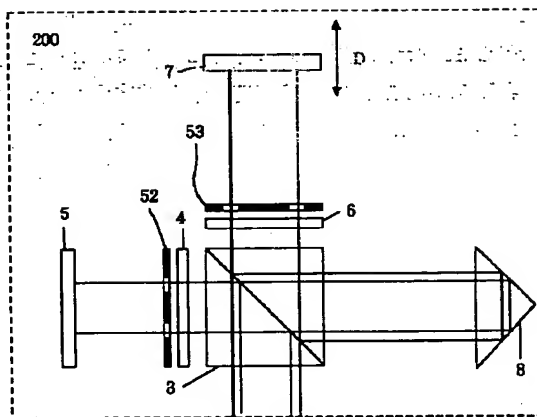
【図7】



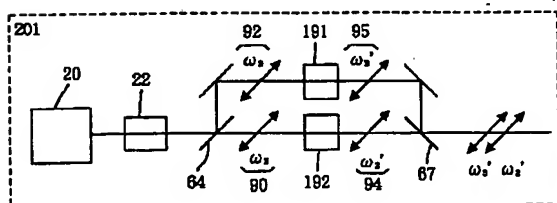
【図8】



【図9】



【図11】



【図12】

